第 37 卷第 21 期　　生　态　学　报　　Vol.37,No.21
2017 年 11 月　　ACTA ECOLOGICA SINICA　　Nov.,2017

DOI: 10.5846/stxb201608161679
单立山,李毅,张荣,张正中,种培芳.降雨格局变化对白刺幼苗根系形态特征的影响.生态学报,2017,37(21):7324-7332.
Shan L S, Li Y, Zhang R, Zhang Z Z, Chong P F.Response of the root morphology of *Nitraria tangutorum* seedlings to precipitation pattern changes.Acta Ecologica Sinica,2017,37(21):7324-7332.

降雨格局变化对白刺幼苗根系形态特征的影响

单立山[1,2],李　毅[1,*],张　荣[1],张正中[1],种培芳[1]
1 甘肃农业大学林学院,兰州　730070
2 中国科学院西北生态环境资源研究院,兰州　730000

摘要:为探讨荒漠植物白刺幼苗根系形态对降雨格局变化的响应特征,设置 3 个降雨量梯度(W-、W、W+)和 2 个降雨间隔时间梯度(T、T+)进行人工模拟试验,结果表明,1)降雨量和降雨间隔时间对白刺幼苗根系形态有不同程度的影响,且降雨量的作用效应更大。2)降雨量相同时,延长降雨间隔时间均使白刺幼苗主根长、根系平均直径、根体积和根表面积减小,但总根长和根系生物量和总生物量却增加,在高降雨量条件下(W+)延长降雨间隔时间白刺幼苗比根长和比表面积分别增加了 45.09%和 20.20%,但差异均不显著。3)降雨间隔时间相同时,降雨量减少 30%仅使主根长平均增加 12.06%,总根长、根平均直径、根体积和根表面积等根系形态指标均显著减少,比根长和比表面积变化不大;降雨量增加 30%仅使比表面积显著增加,其余各形态指标差异均不显著,低降雨量条件下(W-)主根长与根冠比达到最大,其他指标均在高降雨量条件下(W+)达到最大。4)对 8 个根系形态参数进行主成分分析,根系生物量、总根长、总根表面积、比根长、比表面积和根体积 6 个根系生态参数受降雨格局影响显著。

关键词:降雨量;降雨间隔期;根系形态;白刺

Response of the root morphology of *Nitraria tangutorum* seedlings to precipitation pattern changes

SHAN Lishan[1,2], LI Yi[1,*], ZHANG Rong[1], ZHANG Zhengzhong[1], CHONG Peifang[1]
1 *College of Forestry Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *China*
2 *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*

Abstract: A global climate model has predicted changes in precipitation patterns, with extended periods of time between precipitation events; larger individual precipitation events are expected to increase. Furthermore, with global climate change, local area rainfall patterns have also changed. Over 80 years, the annual precipitation in arid areas of central Asia has generally shown an increasing trend. Such an altered precipitation regime will significantly alter the temporal supply of water to desert ecosystems, and thus have important effects on ecological processes, which could ultimately affect species composition and biological diversity. Root growth of seedlings is the most important stage in plant regeneration and the most sensitive in the plant life cycle to environmental conditions. The responses of root morphology to changes in precipitation and the ability of seedlings to adapt can directly affect the success of subsequent seedling establishment, and may affect regeneration dynamics. *Nitraria tangutorum*, a super-xerophytic shrub, exhibits a strong tolerance for drought, cold, and saline-alkali soil. The shrub vegetation type in which *N. tangutorum* is the dominant species is an important vegetation type in the deserts of northwestern China. As a result, *N. tangutorum* is the key species for the revegetation of these arid and semiarid areas. Most research has examined the impacts of the amount of precipitation on this species rather than the effects

基金项目:国家自然科学基金(41361100,31560135,31360205,41461044);甘肃省科技支撑项目(1604FKCA088);中国博士后科学基金(2014M552514);甘肃省高等学校科研项目(2015A-067,2015A-069)

收稿日期:2016-08-16;　　**修订日期**:2017-03-01

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liyi@gsau.edu.cn

of both the amount and interval of precipitation. To understand how climate-driven changes in precipitation can affect desert plants, especially the response of the root morphology to precipitation patterns change, we conducted a controlled experiment with two factors: precipitation quantity (natural precipitation as a control, reduction of 30% and increase of 30%) and interval (time elapsed between two precipitation events; 5 or 10 days). The results showed that root morphological characteristics were influenced by total precipitation and precipitation interval, the former playing a more significant role than the latter. Under the same precipitation condition, the main root length, root diameter, root volume, and root surface area were decreased, total root length, root biomass, and total biomass were increased by extended precipitation intervals, and specific root length (SRL) and specific root area (SRA) were considerably increased by 45.09% and 20.20% in high precipitation, respectively, but the difference was not significant. For the same precipitation condition interval, the main root length was increased by 12.06%, total length, diameter, volume and surface area were significantly decreased, and SRL and SRA were basically unchanged in precipitation reduced by 30% conditions. The SRA increased significantly, but the other index differences were not significant. The main root length and root-shoot ratio were largest in low precipitation, but others (total root length, root surface area, average root diameter, root volume, root biomass, SRL and SRA) were larger in high precipitation conditions. Eight characteristics of root morphology were analyzed using principle component analysis. The characteristics of root biomass, total root length, total root surface area, SRL, SRA and root volume were significantly affected by precipitation pattern changes. We suggested that the root morphology of *N. tangutorum* seedlings was mainly affected by the amount of precipitation. However, the precipitation interval could be as important as the amount of precipitation for the root morphology of *N. tangutorum* seedlings. Increasing the precipitation amount and extending the precipitation interval (less frequent but higher volume precipitation events) enhanced root growth and population regeneration.

Key Words: precipitation; precipitation interval; root morphological; *Nitraria tangutorum*

全球气候变化导致的全球或局部地区的降雨格局(包括降雨量,降雨强度及降雨的季节分配)发生了改变[1]。近 50 年来,西北干旱区降雨量呈增加趋势[2],夏季降雨和极端大降雨事件的频率将增加[3]。降雨是干旱区荒漠植物的主要水分来源,其变化必将影响到荒漠植物生理及生态学过程,进而影响干旱荒漠区陆地生态系统的植物群落组成[4]。然而,以往的研究更多地关注降雨量的变化,对降雨量的时间分布即降雨格局变化效应的研究相对较少[5]。

根系形态是描述植物根系随环境变化的重要指标[6],土壤水分变化是影响植物根系形态特征的重要因素,当土壤水分发生变化时,植物根系最先感知并迅速产生信号传递到各个器官,进而改变自身形态和生理生化特性以适应变水环境[7]。降雨格局变化最直接的影响是改变土壤含水量,进而改变土壤的温度、结构和养分含量等,最终影响植物的形态、结构和生理等方面[8-9]。然而,以往关于土壤水分变化对植物根系形态影响的研究结论并不一致,有研究发现土壤水分减少抑制植物根系扩展和地上部水分利用使根系伸长生长受阻,主根直径变细,但总根长却增大[10]。也有研究指出轻度水分胁迫能促进植物根系生长,增加总根长、根表面积以增大对水分和养分的吸收,但使根体积和根平均直径降低[11]。可见,植物根系形态随土壤水分变化表现出不同的变化趋势。然而,未来降雨格局变化所导致的土壤水分改变对植物根系形态的调整我们并不清楚,因此,加强不同降雨格局下土壤水分变化的根系形态的研究,对进一步理解全球气候变化背景下根系生长对降雨格局变化的响应及适应机制具有重要的生态意义。

白刺(*Nitraria tangutorum*)是我国西北荒漠地区常见的优势建群种,以往对它们的研究多集中在生理特性、抗旱性、水分利用效率及群落功能方面[12-14],针对降雨变化白刺生长和形态特征也有一些报道,但主要集中在地上枝条形态对人工增雨响应的研究[15-17],而针对地下根系形态特征随降雨格局变化的响应尚未见报道。有研究指出我国西北荒漠区整体出现增温变暖、降雨增加的趋势,且各地区增温或降水增加幅度不同,降雨变幅震荡更为剧烈[18];且极端降雨事件增多,表现为最大的 1 天和 5 天降雨总量、逐年平均降雨强度和持续干旱天数呈增加趋势[19]。根系作为植物水分的吸收器官,降雨变化其最先感知,在未来荒漠区降雨变化的

格局下典型荒漠植白刺根系将如何响应？降雨变化对其幼苗更新将产生怎样的影响？这些问题需进一步研究。本研究提出以下科学问题：（1）在全球变暖的大背景下，荒漠区降雨量的变化对典型荒漠植物白刺幼苗根系生长的影响如何？（2）荒漠区降雨间隔延长（持续干旱）对白刺根系形态特征及生物量分配的影响如何？（3）荒漠区降雨格局变化对白刺根系生长是起促进还是抑制作用？探讨这些问题对揭示白刺幼苗根系生长对降雨格局变化的响应机制以及对预测未来荒漠区降雨格局变化下白刺的演化方向与速率具有重要意义。

1 材料和方法

1.1 试验材料

选用白刺 2 年生容器苗为试验材料。采用盆栽方式，花盆外径为 38 cm，内径为 36 cm，高度为 26 cm。盆栽用土为黄绵土，田间饱和持水量 20.12%，风干土土壤含水量为 5.5%，每盆装粉碎过筛的风干土 15 kg。于 2014 年 5 月初将白刺幼苗移栽入花盆定植，每盆栽植一株，人工进行管理以保证成活，苗木成活后 7 月初置于可移动的防雨棚内进行控水试验，通过遮雨棚避免当地降雨对幼苗的影响。

1.2 试验设计

根据西北荒漠区民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站气象数据显示，其年平均降雨量为 115 mm，降雨量呈增加趋势，降雨间隔期也将延长，1961 年到 2008 年增加速率为 4.462 mm/10a。1985—2008 年 1—10 mm 的小雨占年降水总量的 59.55%，10—20 mm 降水强度，占多年平均减少量的 22.24%，24 a 当中 10—20 mm 降水强度的增加速率最明显[20]。因此，本试验设置 3 个降雨量梯度和 2 个降雨间隔时间梯度，共 6 个处理，每个处理重复 3 次。以月平均降雨量为对照，相应减水 30%，加水 30%，分别用 W、W-、W+表示；降雨间隔时间梯度为 5 d（自然降雨间隔时间）和 10 d，分别用 T 和 T+表示。6 个处理分别表示为：1）W-T：减少降雨量，与自然降雨间隔时间一致；2）W-T+：减少降雨量，增加降雨间隔时间；3）WT：自然降雨量，自然降雨间隔时间；4）WT+：自然降雨量，增加降雨间隔时间；5）W+T：增加降雨量，自然降雨间隔时间；6）W+T+：增加降雨量，增加降雨间隔时间。其中降雨量增加或减少，指模拟雨量是在自然降雨量基础上增加或减少 30%；降雨间隔时间不变是指人工模拟降雨的时间与自然降雨一致，降雨间隔时间增加，是指把试验期内每月第二次模拟降雨的时间定为两次自然降雨事件的间隔期延长 50%的那一天，并将第二次自然降雨后与这一天之前发生的自然降雨一并添加，以达到延长降雨间隔期并增加大降雨事件次数的目的。

试验于 2014 年 7 月至 10 月在甘肃农业大学校内试验场进行，以每个自然降雨事件的降雨量、降雨间隔时间为基准，通过浇水间隔时间和平均每次浇水量的控制实现对总降雨量和降雨间隔时间梯度的模拟（表 1），生长季末期（10 月）对其进行破坏性取样，实验期间为防止土壤板结，需定期松土、除草和防止病虫害。

表 1 实验中的降雨量和降雨间隔时间设置

Table 1 Total precipitation and precipitation interval setting in experiment

时间 Time	月平均降雨量 Monthly mean precipitation/mm	降雨间隔期 Precipitation interval	降雨量 Precipitation/mL			浇水频次 Watering frequency
			W-	W	W+	
7 月 July	26.98	T	253	361	470	6
		T+	506	722	940	3
8 月 August	20.85	T	195	279	363	6
		T+	390	558	726	3
9 月 September	30.45	T	286	408	530	6
		T+	572	816	1060	3

T，降雨间隔时间为 5 d，mean precipitation interval of 5 days；T+，降雨间隔时间为 10 d，precipitation interval of 10 days；W，平均月降雨量 mean monthly precipitation；W-，减水 30% water reduction by 30%；W+，加水 30% water addition by 30%

1.3 取样与测定

2014 年 10 月 6 日采集生长季末白刺幼苗，取样时用手轻轻拍打花盆外侧使土体中的根系与土壤分离，

用卷尺测量主根长后,从基径处将植物地上部分与根系分离,将完整的根系转入自封袋带回实验室进行室内处理,扫描仪进行根系扫描后用 WinRhizo 根系分析系统进行形态指标分析,获得根系的总根长、根平均直径、根体积、根表面积,将扫描后的根系装入信封在烘箱中以 80 ℃恒温烘至恒重后称重,得到其根系生物量。比根长(Specific root length,SRL)、比表面积(Specific root area,SRA):分别为根系总根长和根表面积与根系生物量(Root Biomass,RB)的比值。

1.4　数据处理

利用 SPPS 17.0 软件对数据进行统计分析,采用 LSD 法进行差异显著性分析(α = 0.05)。其中,单因素方差分析被用于分析降雨量或降雨间隔时间对白刺幼苗根系形态特征的影响,双因素方差分析被用于分析降雨量和降雨间隔时间的交互作用对其形态特征的影响。主成分分析用于研究降雨量和降雨间隔差异对根系形态变异的影响。利用 Excel 2010 软件作图,图中数据为平均值±标准误。

2　结果与分析

2.1　不同降雨格局条件下白刺幼苗主根长、总根长的变化

由表 2 可知,降雨量对总根长和主根长有显著影响(P<0.05),总降雨量和降雨间隔时间交互作用对主根长有极显著的影响(P<0.01),而降雨间隔时间及两者交互作用对白刺幼苗总根长无显著影响(P>0.05)。由图 1 可知,降雨量一致,除主根长之外,降雨间隔时间由 5 d 延长到 10 d 的大降雨事件提高了土壤含水量,同时也促进了白刺幼苗总根长生长,但差异均不显著(P>0.05)。而当降雨间隔时间一致时,降雨量的变化对白刺幼苗主根长和总根长有不同程度的影响,与对照相比,降雨量减少 30%,总根长平均显著减少 31.5%(P<0.05),而主根长显著增加 86%(P<0.05),且在 W-T 的处理中达到最大;降雨量增加 30%,W+T+的处理下总根长达到最大,平均增加 1.65%。

表 2　总降雨量和降雨间隔时间对白刺幼苗主根长、根系生物量、总根长、根平均直径、根体积、根表面积、比根长和比表面积影响的双因素方差分析(F 值)

Table 2　Results (F-values) based on Two-way ANOVA of the effects of total precipitation and precipitation interval on crown, basal diameter, main root length, leaf biomass, stem biomass, aboveground biomass, belowground biomass, total biomass, and root/shoot ratio to the unplanted half bucket area of *N. tangutorum* seedlings

自变量 Independent variable	变异来源(自由度) Variance source(df)	主根长 Main root length	总根长 Total toot length	根系生物量 Root biomass	总生物量 Total biomass	根冠比 Root/shoot	根系平均直径 Root diameter	根体积 Root volume	根表面积 Root surface area	比根长 Specific root length (SRL)	比表面积 Specific root area (SRA)
T	3	0.822	0.005	0.106	0.446	0.01	1.384	0.674	0.158	2.242	0.692
W	3	4.607*	4.715*	1.453	4.729*	4.80*	4.196*	5.084*	4.095*	2.386	8.537**
T×W	6	11.054**	0.682	0.615	0.005	2.84	0.215	0.464	0.59	2.453	1.79

*,表示显著水平(P< 0.05);**,表示极显著水平(P < 0.01);T,降雨间隔时间效应 precipitation interval effect;W,总降雨量效应 total precipitation quantity effect

2.2　不同降雨格局条件下白刺幼苗根平均直径、根体积和根表面积变化

双因素方差分析发现,降雨量对白刺幼苗根平均直径、根体积和根表面积有显著影响(P<0.05),降雨间隔时间及两者交互作用对其均无显著影响(P>0.05)(表 2)。如图 2 所示,相同的降雨量条件下,延长降雨间隔时间白刺幼苗根平均直径、根体积和根表面积均表现出减小的变化趋势;相同的降雨间隔时间,降雨量减少显著抑制了根平均直径、根体积和根表面积的增长,与对照相比,降雨量减少 30%白刺幼苗根平均直径、根体积和根表面积分别平均显著减少 31.5%、38.63%、37.84%(P<0.05);降雨量增加 30%使根平均直径、根体积和根表面积所有增加,但差异不显著(P>0.05)。

2.3　不同降雨格局条件下白刺幼苗比根长和比表面积的变化

从表 2 可以看出,降雨量对比表面积的影响达到极显著水平(P<0.01),但降雨间隔时间及两者交互作用

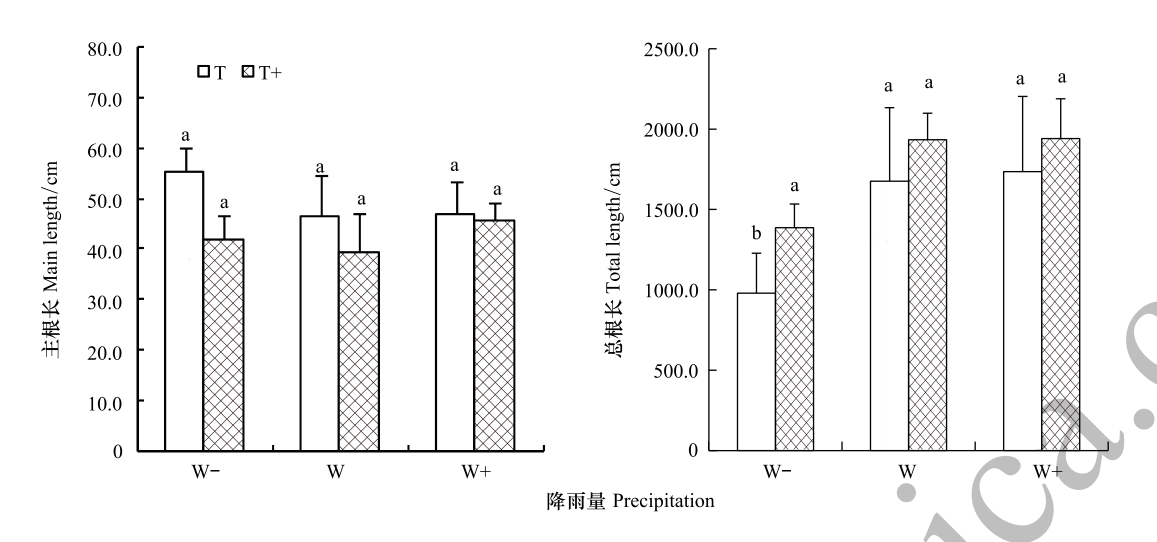


图 1 不同降雨格局下白刺幼苗主根长和总根长的变化

Fig.1 Dynamics of main root length and total root length of *N. tangutorum* seedlings in different precipitation patterns

不同小写字母表示在相同的降雨间隔时间,降雨量变化与对照间差异显著(P<0.05)

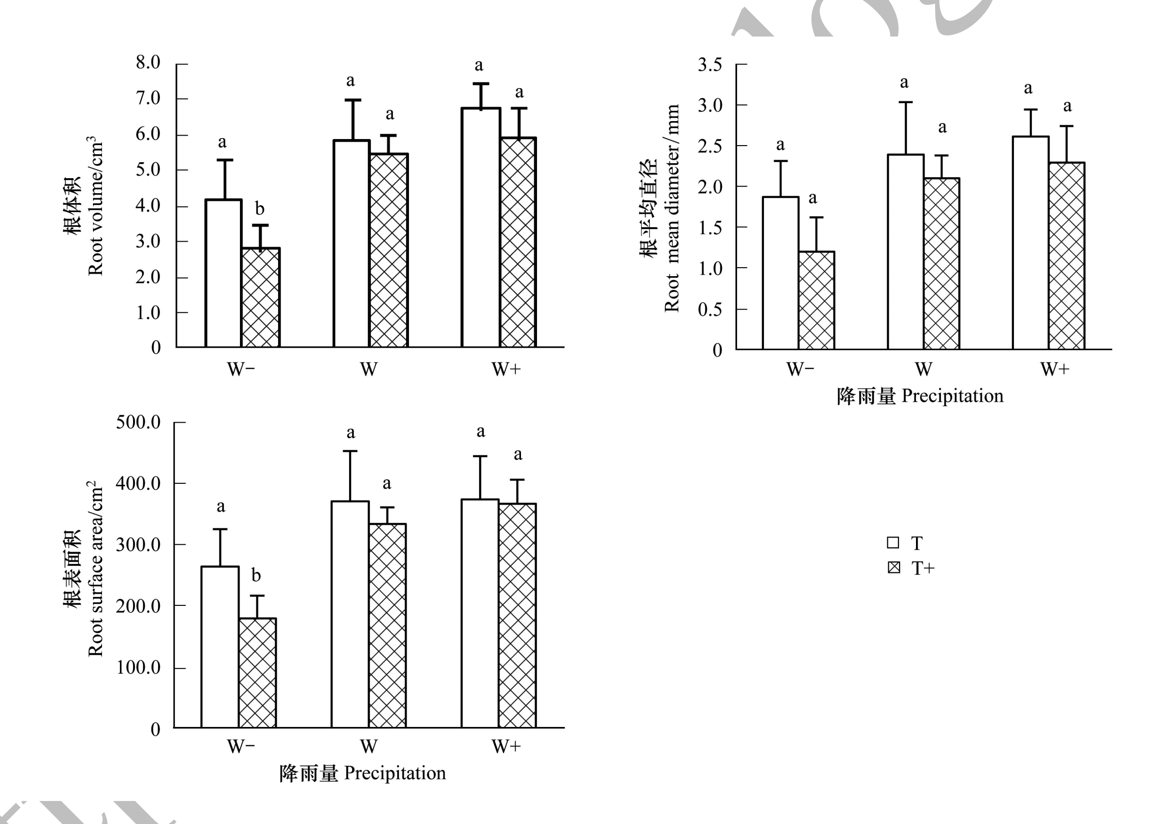


图 2 不同降雨格局下白刺幼苗根体积、根平均直径和根表面积的变化

Fig.2 Dynamics of root volume, root diameter and root surface area of *N. tangutorum* seedlings in different precipitation patterns

对白刺幼苗比根长和比表面积均无显著影响(P>0.05)。从图 3 可以看出,在高降雨量(W+)条件下降雨间隔时间的延长均显著促进了比根长和比表面积增加,而在低降雨量(W 和 W−)条件下,降雨间隔延长对比根长和比表面积影响不大(P>0.05)。在相同降雨间隔条件下,随降雨量的增加比根长和比表面积表现出各异,在正常降雨间隔时间下(T),随降雨量的增加比根长和比表面积变化不大,而在降雨间隔时间延长条件下(T+),降雨量增加显著促进了比根长和比表面积增加,分别平均增加了 17.07%、19.50%。

2.4 不同降雨格局条件下白刺幼苗根系生物量、总生物量及根冠比变化

由表 2 可知,降雨量对白刺幼苗总生物量和根冠比有显著影响(P<0.05),而对根系生物量影响不大(P>

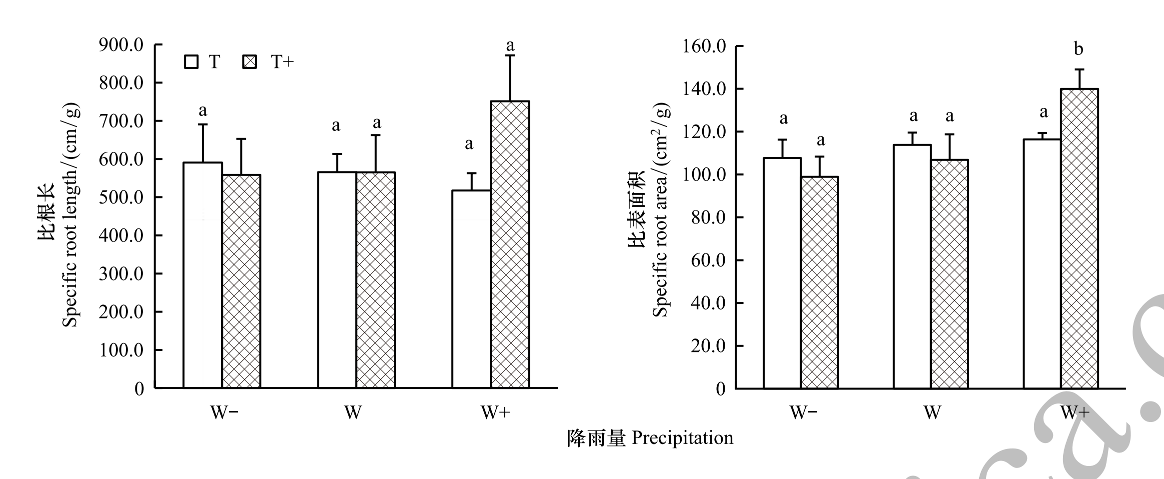


图 3　不同降雨格局下白刺幼苗根系比根长和比表面积的变化

Fig.3　Dynamics of SRL and SRA of *N. tangutorum* seedlings in different precipitation patterns

0.05)。降雨间隔时间及两者交互作用对根系、总生物量及根冠比无显著影响($P>0.05$)。从图 4 可以看出,当降雨量一致时,降雨间隔时间延长形成的大降雨事件均促进了根系及总生物量的增加,但二者差异不显著($P>0.05$)。当降雨间隔时间一致时,随降雨量增加白刺幼苗根系生物和总生物量总体呈现增加的变化趋势,其中降雨量增加 30%使根系和总生物量分别平均增加 48%和 25%;降雨量减少 30%使总生物量平均减少 27%,然而,自然降雨间隔条件下降雨减少 30%促进了地下根系生长,与对照相比(WT),其根系生物量反而增加了 27.4%,根冠比显著增大($P<0.05$),达到最大值 0.78。

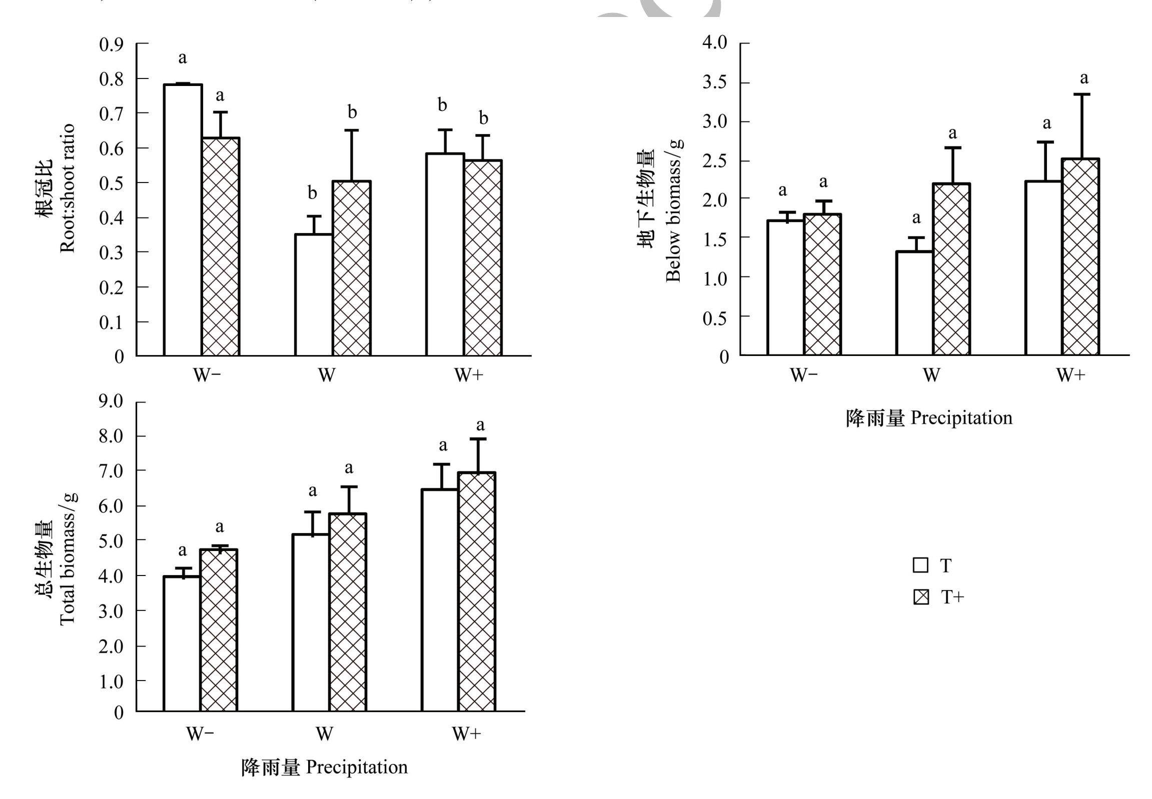


图 4　不同降雨格局下白刺幼苗根冠比、地下生物量和总生物量的变化

Fig.4　Dynamics of root:shoot ratio, root biomass and total biomass of *N. tangutorum* seedlings in different precipitation patterns

2.5　降雨格局对白刺根系形态的影响

为研究降雨格局对白刺幼苗根系形态变异的总效应,采用主成分分析方法对主根长、总根长、根表面积、

平均根系直径、比根长和表面积等 8 个形态参数指标进行了主成分提取。由表 3 可以看出,提取的前 3 个主成分累积贡献率为 85.968%,其值大于 85%,表明前 3 个成分可较好的反映不同降雨格局下红砂根系形态的基本特征,故取前 3 个主成分作为数据分析的有效成分。第 1 主成分与根系生物量、总根长、总表面积呈高度正相关;第 2 主成分与比表面积、比根长呈高度正相关,第 3 主成分与根体积呈高度正相关,可以认为根系生物量、总根长、总表面积、比表面积、比根长和根体积是不同降雨格局下根系形态特征的主要参数。

表 3 主成分载荷矩阵

Table 3 Principal component loading matrix

指标 Parameter	提取的主成分 Extracted component		
	PC1	PC2	PC3
平均根长 Average root length	0.117	−0.241	0.424
根系生物量 Root biomass	0.939	0.115	0.124
总根长 Total root length	0.871	−0.455	0.282
总根表面积 Total root surface area	0.931	−0.096	0.306
平均根直径 Average root diameter	−0.566	−0.156	0.772
根体积 Root volume	−0.39	−0.117	0.864
比表面积 Specific root surface area	0.182	0.900	0.297
比根长 Specific root length	0.116	0.942	0.116
特征值 Eigenvalue	3.042	2.023	1.813
贡献率 Contribution rate/%	38.022	25.283	22.663

3 讨论

根系形态的适应性响应是植物应对生境条件的基本机制之一,它对于水分变化反应较为敏感,当土壤水分发生变化时,植物根系会产生形态和生理等方面的变化来适应环境变化[21]。已有研究表明,在干旱胁迫下,植物特别是荒漠植物会延长主根生长,使其根系在深层土壤的分布有利于吸收利用深层土壤水分,促进植株的生长发育[7]。本研究发现,相同降雨量条件下,降雨间隔缩短(即增加了降雨频次减少了单次降雨量)均促进了白刺幼苗主根长生长,且低降雨量条件下(W−)其值达到最大,这可能的原因当降雨量相同,缩短降雨间隔时间即增大降雨频次减少了单次降雨量,则易形成小降雨事件。在干旱荒漠区因强烈的蒸发,所形成的小降雨事件很难形成有效的土壤水分,白刺则通过主根的伸长生长来获取维持水源以适应这种干旱环境。本研究还发现白刺幼苗总根长随降雨量增加、降雨间隔时间延长均表现增加趋势,这可能是延长降雨间隔时间缩短降雨频次将增加了植物忍耐干旱胁迫的时间,干旱胁迫时间的延长将能诱导白刺幼苗侧根的生长,提高其耐旱能力,而降雨量适当增加的情况下也会诱导白刺细根数量增加从而使总根长增大[22]。

已有研究表明,极端干旱事件导致的水分胁迫会引起植物叶气孔导度下降,甚至气孔关闭[23],严重影响植物的光合磷酸化过程和 1,5-二磷酸核酮糖再生过程[24],降低了植物的光合速率和蒸腾速率使植物生长受阻[25],而水分增加则与之相反。本研究发现,降雨量减少 30%使白刺幼苗根平均直径、根体积和根表面积均显著减少,而随降雨量适当的增大各指标均增大,同时取样过程中发现高降雨量条件下的白刺根系具有发达的细根且密集生长,这可能是干旱胁迫使植物光合作用减弱,侧根和根毛数目减少,根系生物量和根系代谢活性降低,而水分适当的增加后诱发了大量侧根和根毛,增加了其吸收水分和养分面积,表明降雨量适当增加更有利于植物根系生长。前人研究发现降雨的有效性不仅与降雨量大小有关,与降雨间隔时间等因素也有关[26]。本研究还发现,延长降雨间隔时间白刺幼苗根系平均直径、根体积、根表面积均减小,这与赵国靖等[27]研究的达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)经过长时间干旱后由中水提高到高水根系平均直径、根表面积显著增大的结果相反,这可能因为较长降雨间隔时间使植物长时间经受干旱,长时间干旱和单次降雨量增加的交替出现使土壤表层水分波动增大,在降低蒸发损失的同时,可能也增大了径流损失[28];此外,长时间干旱

土壤微生物活性减弱,数量减少,土壤碳、氮的矿化率与通量均明显下降,随着干旱时间的延长,死亡的微生物和植物有机体不断积累,会出现土壤养分富集并瞬间大量释放,这种现象会增加养分淋溶损失的危险,对植物根系从土壤中吸收养分和水分造成影响[29]。由此可见,尽管降雨间隔时间延长单次降雨量增加为原来的两倍,但降雨量的补偿效应使长时间干旱造成的伤害无法完全恢复,只能在一定程度上缓解,使其根系生长受阻,直径体积减少。

比根长和比根面积与植物生长节律密切相关,并受环境条件影响[30]。一般认为,生长较快的植物比生长慢的植物具有较大的比根长,且具有较大比根长和比表面积的植物在水分和养分获取方面更为有利[31]。本研究发现仅在 W+T+的处理下白刺幼苗比根长和比表面积更大,这表明增加降雨量且延长降雨间隔时间的大降雨事件促进白刺幼苗快速生长,且对根系吸收能力有显著影响。徐贵青等研究荒漠植物梭梭(*Haloxylon ammodendron*)发现,根系形态或功能型对外界环境改变可以表现出一定的可塑性,并通过其可塑性调整来适应极端降水事件带来的负面影响[32]。

降雨是荒漠区植物主要是水分来源之一,降雨变化必将改变其生物量分配模式及生长特性,进而影响到植物在群落中的建成与补充[33]。最优分配理论认为,当生境中可利用的水资源减少时,植物会减少对地上部分茎、叶生物量的分配,而将相对多的生物量分配给植物地下。本研究发现,降雨量减少 30%白刺叶片出现不同程度的凋落,地上生物量显著减小,然而地下生物量并没有显著减少,在正常自然降水间隔条件下反而有所增加,则增大了根冠比,这与闫建成等[34]对荒漠一年生植物根系生长对降雨变化的响应的结果一致,表明降雨量的减少使植物把大量的生物量投入到根系,保证了干旱荒漠环境幼苗存活,也体现了荒漠植物对干旱环境的适应能力[35]。

参考文献(References):

[1] 王楠楠, 韩冬雪, 孙雪, 国微, 马宏宇, 冯富娟. 降水变化对红松阔叶林土壤微生物功能多样性的影响. 生态学报, 2017, 37(3): 868-876.

[2] 姚俊强, 杨青, 刘志辉, 李诚志. 中国西北干旱区降水时空分布特征. 生态学报, 2015, 35(17): 5846-5855.

[3] 刘洪兰, 白虎志, 张俊国. 河西走廊中部近 53 年降水变化及未来趋势预测. 干旱区研究, 2011, 28(1): 146-150.

[4] Austin A T, Yahdjian L, Stark J M, Belnap J, Porporato A, Norton U, Ravetta D A, Schaeffer S M. Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems. Oecologia, 2004, 141(2): 221-235.

[5] 周双喜, 吴冬秀, 张琳, 施慧秋. 降雨格局变化对内蒙古典型草原优势种大针茅幼苗的影响. 植物生态学报, 2010, 34(10): 1155-1164.

[6] 李帅, 赵国靖, 徐伟洲, 高志娟, 吴爱姣, 徐炳成. 白羊草根系形态特征对土壤水分阶段变化的响应. 草业学报, 2016, 25(2): 169-177.

[7] 洪光宇, 鲍雅静, 周延林, 李政海, 黄朔, 元征征. 退化草原羊草种群根系形态特征对水分梯度的响应. 中国草地学报, 2013, 35(1): 73-78.

[8] 吴茜, 丁佳, 闫慧, 张守仁, 方腾, 马克平. 模拟降水变化和土壤施氮对浙江古田山 5 个树种幼苗生长和生物量的影响. 植物生态学报, 2011, 35(3): 256-267.

[9] Weltzin J F, Loik M E, Schwinning S, Williams D G, Fay P A, Haddad B M, Harte J, Huxman T E, Knapp A K, Lin G G, Pockman W T, Shaw M R, Small E E, Smith M D, Smith S D, Tissue D T, Zak J C. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. BioScience, 2003, 53(10): 941-952.

[10] 李文娆, 张岁岐, 丁圣彦, 山仑. 干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系. 生态学报, 2010, 30(19): 5140-5150.

[11] 蔡丽平, 吴鹏飞, 侯晓龙, 马祥庆, 郑珊珊, 郑锦文. 类芦根系对不同强度干旱胁迫的形态学响应. 中国农学通报, 2012, 28(28): 44-48.

[12] 李清河, 张景波, 李慧卿, 江泽平, 王志刚. 不同种源白刺幼苗生理生长对水分梯度的响应差异. 林业科学, 2008, 44(1): 52-56.

[13] 王继和, 靳虎甲, 马全林, 张德魁, 刘有军, 胥宝一. 干旱区油蒿种群结构和分布格局分析. 中国沙漠, 2010, 30(3): 534-538.

[14] 朱雅娟, 贾志清, 卢琦, 郝玉光, 张景波, 李磊, 綦艳林. 乌兰布和沙漠 5 种灌木的水分利用策略. 林业科学, 2010, 46(4): 15-21.

[15] 张金鑫, 吴波, 朱雅娟, 卢琦, 李永华. 民勤白刺枝条形态对人工增雨的响应. 中国沙漠, 2012, 32(3): 709-716.

[16] 任昱, 卢琦, 吴波, 刘明虎. 不同模拟增雨下白刺比叶面积和叶干物质含量的比较. 生态学报, 2015, 35(14): 4707-4715.

[17] 何季, 吴波, 鲍芳, 李嘉竹, 姚斌, 叶静芸, 刘建康, 辛智鸣. 人工模拟增雨对乌兰布和沙漠白刺生物量分配的影响. 林业科学, 2016, 52(5): 81-91.

[18] 徐利岗, 周宏飞, 杜历, 鲍子云. 1951-2008 年中国西北干旱区降水时空变化及其趋势. 中国沙漠, 2015, 35(3): 724-734.

[19] 汪宝龙, 张明军, 魏军林, 王圣杰, 马潜, 李小飞. 西北地区近 50a 气温和降水极端事件的变化特征. 自然资源学报, 2012, 27(10): 1720-1733.

[20] 常兆丰, 韩福贵, 仲生年. 民勤荒漠区气候变化对全球变暖的响应. 中国沙漠, 2011, 31(2): 505-510.

[21] 朱维琴, 吴良欢, 陶勤南. 作物根系对干旱胁迫逆境的适应性研究进展. 土壤与环境, 2002, 11(4): 430-433.

[22] 刘锦春, 钟章成. 水分胁迫和复水对石灰岩地区柏木幼苗根系生长的影响. 生态学报, 2009, 29(12): 6439-6445.

[23] 王碧霞, 曾永海, 王大勇, 赵蓉, 胥晓. 叶片气孔分布及生理特征对环境胁迫的响应. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2): 122-126, 131-131.

[24] Moriana A, Villalobos F J, Fereres E. Stomatal and photosynthetic responses of olive (*Olea europaea* L.) leaves to water deficits. Plant, Cell and Environment, 2002, 25(3): 395-405.

[25] Lefi E, Medrano H, Cifre J. Water uptake dynamics, photosynthesis and water use efficiency in field-grown *Medicago arborea* and *Medicago citrina* under prolonged Mediterranean drought conditions. Annals of Applied Biology, 2004, 144(3): 299-307.

[26] Knapp A K, Beier C, Briske D D, Classen A T, Luo Y Q, Reichstein M, Smith M D, Smith S D, Bell J E, Fay P A, Heisler J L, Leavitt S W, Sherry R, Smith B, Weng E S. Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. BioScience, 2008, 58(9): 811-821.

[27] 赵国靖, 徐伟洲, 郭亚力, 吴爱姣, 陈吉, 徐炳成. 达乌里胡枝子根系形态特征对土壤水分变化的响应. 应用与环境生物学报, 2014, 20(3): 484-490.

[28] 张彬, 朱建军, 刘华民, 潘庆民. 极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响. 植物生态学报, 2014, 38(9): 1008-1018.

[29] Bloor J M G, Bardgett R D. Stability of above-ground and below-ground processes to extreme drought in model grassland ecosystems: interactions with plant species diversity and soil nitrogen availability. Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics, 2012, 14(3): 193-204.

[30] Schippers P, Olff H. Biomass partitioning, architecture and turnover of six herbaceous species from habitats with different nutrient supply. Plant Ecology, 2000, 149(2): 219-231.

[31] Comas L H, Eissenstat D M. Linking fine root traits to maximum potential growth rate among 11 mature temperate tree species. Functional Ecology, 2004, 18(3): 388-397.

[32] 徐贵青, 李彦. 共生条件下三种荒漠灌木的根系分布特征及其对降水的响应. 生态学报, 2009, 29(1): 130-137.

[33] 陈锦平, 王振夏, 曾成城, 李帅, 魏虹. 不同水分和植株密度处理对牛鞭草生长及形态的影响. 草业学报, 2015, 24(1): 39-46.

[34] 闫建成, 梁存柱, 付晓玥, 王炜, 王立新, 贾成朕. 草原与荒漠一年生植物性状对降水变化的响应. 草业学报, 2013, 22(1): 68-76.

[35] 曾凡江, 郭海峰, 刘波, 曾杰, 邢文娟, 张晓蕾. 多枝柽柳和疏叶骆驼刺幼苗生物量分配及根系分布特征. 干旱区地理, 2010, 33(1): 59-64.

